

富士山頂に流入する大気をはかる

徳島大学大学院 医歯薬学研究部 准教授 **竹内 政樹** たけうち まさき

はじめに

昨今、1970年代に猛威をふるっていた光化学スモッグ（大気中の物質が太陽の紫外線と化学反応して生成する有害大気汚染物質）の警報あるいは注意報の発令回数が、九州や西日本を中心に再び増加しています。この要因の一つとして、経済発展の著しいアジア近隣諸国からの越境大気汚染が指摘されています。

日本国内に長距離輸送された二酸化硫黄（ SO_2 ）や窒素酸化物（ NO_x ）、オゾン（ O_3 ）などの酸性ガスは、酸性雨や湖沼の酸性化を引き起こすだけでなく、2013年の初めに突然騒がれ始めた $\text{PM}_{2.5}$ の前駆体としても重要な役割を果たします。 $\text{PM}_{2.5}$ とは、大気中に浮遊している粒径が概ね $2.5\ \mu\text{m}$ （ $1\ \mu\text{m} = 1\text{ m}$ の100万分の1）以下の粒子状物質（particulate matter）のことで、その大きさが非常に小さいため、肺の奥深くまで入り込みやすく、ぜんそくや気管支炎などのリスクを上昇させる

と考えられています。

また、最近の疫学研究において、酸性ガスの一つである亜硝酸ガス（ HNO_2 ）は、呼吸器疾患と深い関連があることも報告されました。したがって、日本国内に流入する酸性ガスを継続的にモニタリングして越境大気汚染の実態を明らかにしていくことは、私たちが健康に生活していくうえで極めて重要であるといえます。

本稿では、大気中の酸性ガスを連続観測するために、筆者らが構築した酸性ガス自動モニタの特徴と、このモニタを用いて富士山頂に流入した SO_2 を継続的に測定した結果について紹介します。なお、 SO_2 は、代表的な大気汚染物質の一つとして、大気汚染防止法で監視の対象となっています。

なぜ、富士山頂？

大気の汚染状況を把握・監視するために、大気汚染物質の観測が全国各地で行われています。しかし、この観測の多くは地表面で行われており、観測結果には、越境汚染物質だけでなく国内から放出された汚染物質の影響も反映されます。そのため、通常行われている大気観測だけでは、越境大気汚染の実態を正確に把握することができません。そこで、筆者らは、日本最高峰の富士山頂を利用して越境汚染物質の観測を試みています（図1）。

富士山は孤立峰であり、その頂（標高3,776 m）は自由対流圏高度に位置します。自由対流圏とは、私たちが生活している空気層（大

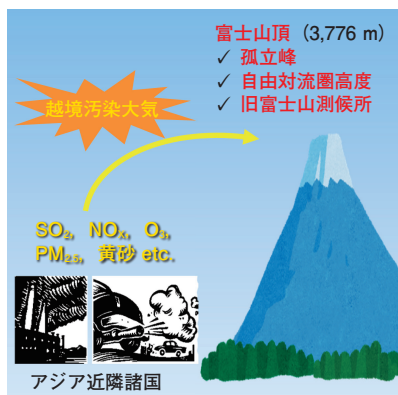


図1 アジア近隣諸国から輸送される越境大気汚染物質と富士山頂

気境界層)の上にある空気層で、高度はおおよそ2 kmから10 kmの範囲を指します。自由対流圏では偏西風(中緯度の上空を西から東に向かって带状に吹く風)が強く吹いているため、東アジア地域から放出された大気汚染物質(SO_2 , NO_x , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, 黄砂など)がいったん自由対流圏まで上昇すると、偏西風によって地上よりも早く日本に輸送されます。

自由対流圏高度の汚染物質を観測する方法として、航空機やゴム気球を使う手法があります。これらの手法は三次元的な観測が可能です。費用が高額なうえ、観測時期が天候に大きく左右されるため、観測データが間欠的になりがちです。一方、富士山頂を利用する場合は、定点観測になりますが、費用が比較的低額なため、連続的なデータが収集可能となり、越境汚染物質を時系列的に把握することができます。さらに、富士山頂には後述する富士山特別地域気象観測所(旧富士山測候所)というインフラが整備されていることから、富士山頂は日本上空に流入する越境汚染大気とバックグラウンド大気(清浄大気)を観測するには理想的な場所といえます。

酸性ガスの捕集方法

これまでに、さまざまな酸性ガス捕集法が提案されていますが、一般的に広く使用されている捕集法としてフィルターパック法と呼ばれる手法があります。この手法では、大気を吸引し、最初に $\text{PM}_{2.5}$ などの粒子状物質を繊維状のフィルターで取り除きます。続いて、薬液を浸して含ませたフィルターで、酸性ガスを捕集していきます。

現地で酸性ガスのサンプリングを行った後、ガス成分を捕集したフィルターを研究室に持ち帰って、捕集成分を抽出し、抽出液をイオンクロマトグラフ(溶液中のイオン成分を分離して検出する装置)などの分析機器で分析します。このフィルターパック法は、利

便性に優れることからさまざまなサンプリング地点で使用されていますが、サンプリングごとにフィルターを手動で交換する必要があります。そのため、1日のサンプリング回数は数回が限度となり、刻々と変化するガス濃度を追跡することができません。もちろんサンプリング頻度を上げることは可能ですが、その分、新たなマンパワーが必要になります。また、この捕集法では、サンプリングから分析までの工程で試料が汚染される可能性もあり、測定値の信頼性を下げかねません。

そこで、筆者らは、酸性ガスの挙動をより詳細に検討するために、ウエットデニューダー法と呼ばれるガス捕集法を採用して酸性ガスを捕集しています。ウエットデニューダー法では、デニューダーの両壁面にガス捕集液が流れています。この中に、ガス/粒子状物質が混合した大気を流すと、ガス分子は、デニューダー内を拡散することによってデニューダーの壁面を流れるガス捕集液に衝突し、捕集されていきます。

一方、拡散度の小さな $\text{PM}_{2.5}$ などの粒子状物質は、ガス捕集液に衝突することなく、デニューダーを通過していきます。そのため、ウエットデニューダー法ではガス成分のみを選択的に捕集した捕集液を連続的に得ることができます。このウエットデニューダーとイオンクロマトグラフを組み合わせたことによって、富士山頂でサンプリングから分析までを自動で行うことが可能となり、1日のサンプリング頻度を多く設定することができます。

図2aに、私たちが独自に設計・製作した酸性ガス捕集器、ウエットデニューダーの概略図を示します。

ウエットデニューダーは、両側のアクリル樹脂製のプレートとテフロン製のスペーサーで構成されます。大気サンプルはプレート間を下方から上方に向かって吸引され、捕集液はプレートの内壁に沿って上から下に流れま

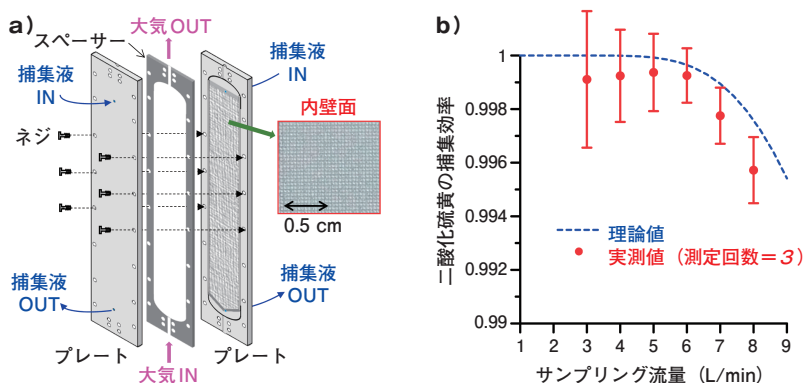


図2 独自に設計・製作した酸性ガス捕集器，ウェットデニューダーの概略図
a) ガス捕集器の概略図。b) ウェットデニューダーによる二酸化硫黄ガスのサンプリング流量と捕集効率の関係。図中の赤色のエラーバーは標準偏差を表す。

認定 NPO 法人 富士山測候所を活用する会



写真1 富士山頂の富士山特別地域気象観測所（旧富士山測候所）

a) 観測所の外観。b) 観測所内に設置された酸性ガス自動モニタ。c) 観測所の出入り口。d) 大気観測研究の風景。現在、観測所は写真上部のロゴマークに示した認定NPO法人富士山測候所を活用する会によって管理運営されており、夏季の2ヵ月間のみ、研究・教育の場として公開されている。

す。この内壁の表面は捕集液による濡れ度を上げるために、特殊な微細加工が施されています。ウェットデニューダーは、サンプルガスと捕集液が直接接しているため、ウェットデニューダーの壁面はガス成分のほぼ完全な捕集面となり、高いガス捕集効率が期待できます。

このウェットデニューダーによる SO_2 の捕集効率を実際に測定した結果を図2bに示します。図の横軸がサンプリングガスの流量、縦軸が SO_2 ガスの捕集効率を示しています。赤色のプロットが実測値で青色の曲線がウェットデニューダーの寸法などから計算された理論値になります。いずれのサンプリング流量においても、実測値と理論値はよく一致しており、 SO_2 の捕集効率は99.5%以上となりました。一方、ウェットデニューダーに捕捉される $\text{PM}_{2.5}$ などの粒子状物質は数%程度であったことから、筆者らが製作したウェットデニューダーは、ガス成分のみを選択的に捕集しているといえます。

このウェットデニューダーとイオンクロマトグラフを組み合わせで構築した酸性ガス自動モニタは、大気中の酸性ガスを15分ごと（1日あたり96回）に連続して追跡することができます。

富士山頂における大気観測

富士山頂で酸性ガスを測定するために、構築した酸性ガス自動モニタを富士山特別地域気象観測所（写真1）に運び込みました。この観測所の前身は富士山測候所であり、この名称の方がなじみ深い読者も多いと思います。

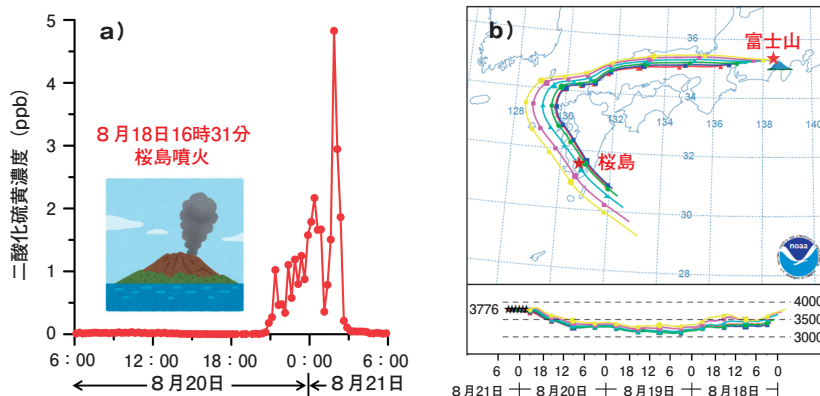


図3 2013年の夏季に得られたSO₂のデータ

a) 2013年8月20日6時から21日6時までの富士山頂における二酸化硫黄濃度の時間変化。縦軸のppbは10億分の1 (parts per billion) を意味し、大気における気体の濃度の単位に用いられる。b) 2013年8月20日21時から21日3時までに富士山頂 (3,776 m) に流入した気塊の後方流跡線解析 (米国海洋大気庁のHYSPLIT Modelを使用)。図中の流跡線上のシンボルは6時間ごとにプロットされている。

富士山測候所は2004年に気象庁の常駐観測が終了した後、2007年からは研究施設として活用されています。現在では、名称を富士山特別地域気象観測所に変更し、その立地特性を利用して、大気化学の他に、放射線科学、大気電気、永久凍土、天文学、高所医学、高所順応トレーニング、食品科学などの研究や宇宙科学技術、ライブ中継、理科実験教材開発、富士山学校科学講座といった教育の場として幅広く活用されています。

富士山頂における酸性ガス観測結果の一例として、2013年の夏季に得られたSO₂のデータを図3aに示します。図の横軸が観測時刻、縦軸がSO₂の濃度を示しています。8月20日の午後9時ごろまでは、SO₂は非常に低濃度で推移しており、清浄な気塊が富士山頂に流入していました。しかし、午後9時ごろを境にSO₂濃度は急上昇し、翌朝3時頃まで高濃度の状態が続きました。

このデータを最初に確認したときは何が起こったのか分かりませんでしたが、この観測時刻に富士山頂に流入した気塊の後方流跡線 (気塊がどこから来たのかを時間をさかのぼって追跡する方法で、風向、風速、気温などの気象データから計算される) をみると、桜島上空

を通過してきたことが分かりました (図3b)。

桜島では、8月18日の夕方に大規模な爆発的噴火があり、このときの噴煙は火口縁上5,000 mに達しています。桜島の噴煙には多量のSO₂が含まれていることから、富士山頂で観測された高濃度のSO₂は、直線距離で850 kmも離れた桜島から輸送されてきたものと推測しています。

おわりに

筆者らは、越境大気汚染の実態を明らかにするために、ウェットデニューダーという独自のガス捕集器を用いた酸性ガス自動モニタを構築して、富士山頂で酸性ガスの連続観測を行ってきました。

今回紹介したSO₂の観測データは、越境汚染物質を捉えたものではありませんが、富士山頂で大気汚染物質を観測する有用性は十分に示されたと思います。今後は、国民の関心が高まっているPM_{2.5}とその前駆体である酸性ガスを同時に観測可能な分析モニタを開発し、それを富士山頂で稼働させることで越境大気汚染物質の挙動を明らかにしてゆきたいと考えています。